

高平均功率板条激光器设计研究

唐晓军 张世文 杜涛 孙维娜 赵之浩

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要 报道了适用于板条激光器高平均功率运转的晶体结构设计, 抽运腔设计, 谐振腔设计; 给出了实验结果: 用单根板条(6 mm×30 mm×203 mm)达到了输出功率 $P=1028$ W, 重复频率 $f=100$ Hz, 连续工作时间 $t=0.5$ h, 光束质量 $M_x^2=2.386$, $M_y^2=2.528$, 输出不稳度: 2.1%, 激光脉冲宽度 $\tau=0.238$ ms。

关键词 板条激光器, 高平均功率, 非稳腔, 二维变反射率镜

中图分类号 TN242:TN248.1 文献标识码 A

Study of High Average Power Solid-state Slab Geometry Laser

TANG Xiao-jun ZHANG Shi-wen DU Tao SUN Wei-na ZHAO Zhi-hao

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015)

Abstract This paper discusses the design the crystal structure, pump cavity, and laser resonator of high average power solid-state slab geometry laser. A laser with a output power of 1028 W at 100 Hz, and with a beam quality of $M_x^2=2.386$ and $M_y^2=2.528$ has been developed. The instability of output power is less than 2.1% with in 0.5 h, and a pulse width is 0.238ms.

Key words slab geometry laser, high average power, unstable resonator, two-dimensional variable reflectivity mirror

1 引 言

由于高平均功率固体激光系统具有广阔的应用前景,所以国内外相关的研究工作一直长盛不衰。早在 80 年代日本就已研制出 1 kW 的棒状高平均功率 Nd:YAG 激光器。到 90 年代已达到 2~3 kW 以上的研究水平,这类高平均功率激光器采用多棒串联方式。美国、德国、法国等国商品化的高功率激光器也多采用此类结构。但这类激光器光束质量差,发散角较大。因为棒状 Nd:YAG 工作物质激光器内振荡光通光方向与晶体内的温度梯度方向垂直,振荡光束受到晶体热应力影响产生双折射,受热透镜效应影响在空间上产生聚焦,严重影响激光束光束质量,限制 Nd:YAG 激光器输出功率的进一步提高。为解决上述激光系统的这些问题,美国通用电气公司提出了板条状几何结构工作物质激光器的概念,在 1972 年申请了第一个专利^[1]。经过多年研究,这类激光器到 90 年代已有重大突破。这类激光器研究的水平以美德日等国为代表,1990 年报导了 GE 公司实验室达到 1 kW 高强度闪光灯抽运的板条状 YAG 激光器,器件效率达 6%,板条尺寸为

6 mm×25 mm×210 mm。1995 年报导了该公司最新研究水平:输出功率 500 W,光束质量达到 2 倍衍射极限,重复频率 100 Hz。德国柏林固体激光研究所在板条状激光器的理论和单元技术研究上在 90 年代中期取得了令人瞩目的成果。1992 年在单级输出 475 W 时,光束参数积优于三倍衍射极限。1993 年报导了一振二放板条激光系统输出功率 2.3 kW,光束质量 5×2.5 mm·mrad。日本三菱电气公司 1995 年报导采用四灯抽运紧耦合漫反射聚光腔稳定谐振腔输出功率达 1400 W^[2~7]。

90 年代中期以来,二极管抽运固体激光器的发展是迅速的。国际上主要发达国家都投巨资发展高功率的二极管抽运固体激光器。新材料新结构不断涌现,二极管抽运的 Yb:YAG 薄片激光系统,棒状激光系统,设计上都有很多新特点;输出都有达到上千瓦,光束质量仅为几倍衍射极限的报道。而板条状几何结构工作物质的激光系统的研究并没因抽运技术的改进,新材料的采用而停滞不前;相关研究仍在发展。本文以作者完成的九五预研课题为例,介绍板条激光系统研究的相关结果。

2 晶体设计

板条状几何结构工作物质设计如图 1 所示,光束在工作物质中走之字光路。取板条的长、宽、高分别为 c 、 a 、 b ,对应取板条长度方向为 Z 方向,宽度方向为 X 方向,高度方向为 Y 方向。在 Y 方向均匀抽运, X 方向对称抽运,从 $X = \pm a/2$ 处两抽运面相向注入抽运能量;两抽运面同时也是冷却面,需要均匀冷却。在 $Y = \pm b/2$ 处两侧面绝热,即令 $\partial T/\partial Y = 0$ 。这样,只在 X 方向存在温度梯度,光束在两抽运面间全内反射,沿 Z 方向传输,在 XOZ 面内形成之字型光路,补偿了由于温度梯度所造成的波前畸变和偏振特性变化。因此在理想情况下,“之”字型光路的板条状工作物质激光器输出激光束几乎不受热畸变的影响。当然在实际研制的激光器中,由于复杂的工艺要求,难以做到完全的一维温度场,即 $\partial T/\partial Y \neq 0$,在实际工作中不存在理想的绝热。此外,还存在着端面效应及侧面的边缘效应等问题,一般情况下板条状工作物质激光器的工作状态与理想状况还有偏离。

图 1 描绘了光束在 Nd:YAG 板条内的传输情况。由图 1(a) 可得板条中心线长度 c ,宽度 a ,顶角 S ,及内角 α 之间的关系^[5]。

$$c = Na/\tan\alpha \quad (1)$$

$$\alpha = 90^\circ - S - \arcsin(\sin\theta/n) \quad (2)$$

式中, N 为在板条内的全内反射点数, n 为板条材料

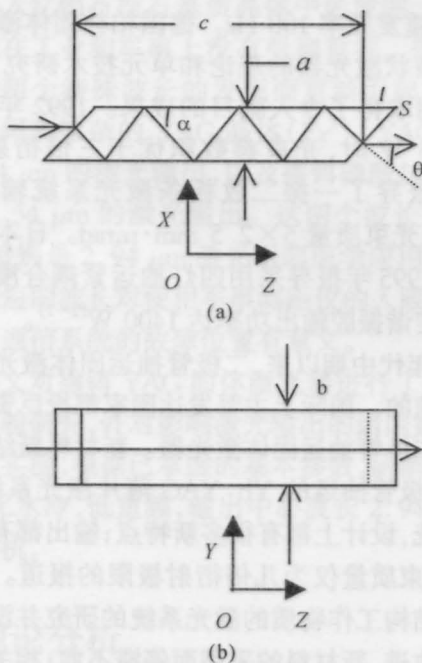


图 1 Nd:YAG 板条中的激光光路

Fig. 1 A beam propagates in the Nd:YAG slab

的折射率,对于 Nd:YAG 材料 $n = 1.82$, θ 为出射角(或入射角)。

不难看出,设计 Nd:YAG 板条时,内角 $\pi/2 - \alpha$ 得大于全内反射临界角,板条的中心线长度 c ,宽度 a ,顶角 S ,受公式(1)制约,不是相互独立的,其取值应保证 N 为整数。而 N 偏离整数会使输出功率急剧下降。另外为了保证理想的热补偿, N 要取为偶数。

较常规的设计要求是全内反射大面(即是抽运面和冷却面)和通光面高精度抛光,其精度要求为 $\lambda/5 \sim \lambda/10$,平行度 $10'$,角度公差 $\pm 2'$;而另两个侧面打毛。抑制不必要的寄生振荡,棱边的处理与普通棱镜的要求类似,不能保留特别锐利的棱角。板条晶体的全内反射大面如用水来冷却,则应加镀一层保护膜,一是保证全内反射的顺利进行,二是保护 Nd:YAG 晶体的光学表面免受冷却水的冲刷。在同样体积条件下,如果板条晶体的宽厚比大于二,则其所能承受的抽运功率将高于圆棒(断裂极限内),这也是工作物质板条状结构设计适于高平均功率运转的特点。

3 抽运腔设计

这里涉及到三个问题,一是晶体封装,二是抽运耦合,三是高效均匀冷却。晶体封装是一个很重要又很难解决的问题。尤其在高功率运转条件下。以一个典型的晶体尺寸为例($6 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 203 \text{ mm}$):晶体在空间的摆放位置不能任意,要考虑到重力因素,由重力在晶体内产生的应力不应严重影响光束在晶体内的传播;同样,夹持晶体的夹具也不应对晶体施加过大的压力或张力。将光弹效应的影响降至最低。当然,为了高效冷却,冷却液的流速很高,压力也很大,水路和光路的隔离密封是要有足够的强度。晶体的端头封装还要避免晶体的被封装部位局部过热,防止抽运光和振荡光烧蚀密封材料。晶体的侧壁绝热可以由晶体夹具结构的特殊安排来实现。结合整个抽运腔的设计,对晶体侧壁冷却和加热维持平衡,以实现理想边界条件。

抽运耦合的一个重要要求是达到均匀抽运,抽运灯对称放置在板条晶体两侧,做到相向均衡抽运。聚光腔反射的抽运光和抽运灯直射到晶体上的抽运光总的强度分布沿板条晶体高度方向应是平坦的。哪怕微小的聚焦和强度差也会破坏晶体内合理的增益分布和温度分布,直接影响到之字光路的补偿效

果,降低光束质量。我们采用了非成像的漫反射聚光腔,紧耦合抽运,抽运效率高,抽运光的强度分布也很均匀。

采用直接水冷的方式对板条晶体进行冷却;在聚光腔内抽运灯和晶体用滤紫外石英玻璃板分隔,分别冷却;同对称抽运类似,冷却水在晶体两侧的流场分布,压力分布也要严格一致,使得最终的冷却效果一致,附加到晶体上的压力均衡,保证晶体中的温度分布和应力分布接近理想状况。

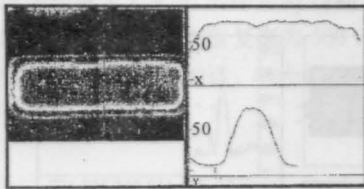


图2 抽运均匀性测量图(荧光分布)

Fig. 2 Measured pump uniformity (fluorescence profile)

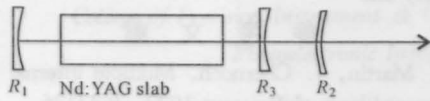


图3 谐振腔原理图

Fig. 3 Schematic of the resonator

4 谐振腔设计

板条状工作物质的结构特点使相应的谐振腔设计具有许多异于圆棒工作物质激光系统的特性。非轴对称的通光孔径要求同样非轴对称的腔内元件;在高度方向上较大的尺寸(例如 30 mm)不利于系统的低阶模运转,在宽度和高度方向上剩余的热透镜效应大小不一,甚至是符号相反的。采用稳定谐振腔,为抑制高阶模运转,一般选用折叠光路的办法,压缩高度方向上的尺寸;采用非稳谐振腔,则要镀制非轴对称的变反射膜,设计非轴对称的谐振腔元件,来达到输出光束质量的提高。

如上图工作中的板条不能等效为单一的薄透镜或厚透镜,它是一个像散元件,忽略掉折射率分布不均匀的高阶分量;热致双折射产生的影响也被很好地补偿了;但由于理想边界条件不能完全满足,以及不可避免的端头效应,在子午面和弧矢面间存在较为严重的像散(如图1)。简而言之,在子午面上存在正透镜效应,在弧矢面上存在负透镜效应。进行谐振腔设计时,要在腔中加上适当的像散元件,以补偿板条晶体产生的像散。谐振腔设计采用几何光学

近似,以虚共焦腔为设计目标。取输出镜为凹凸球面镜,全反镜为平凹球面镜,(凹面镀全反膜)。补偿镜为平凹柱面镜;由输出镜的凸面和全反镜的凹面形成望远镜型结构,补偿镜的两个通光面镀增透膜,插入腔内,在子午面内引入一负透镜。在子午面和弧矢面内分别计算,找出各自的共轭光束,调整腔参数,使光束在子午面和弧矢面内有相同的自再现模,近平行输出,且使腔内有合适的放大率。综合考虑输出功率与光束质量的要求,取放大率 $M=2$ 。影响非稳腔输出功率的一个重要参数是输出耦合度 T , $T=1-R_0/M^2$,在放大率 M 确定之后,非稳腔输出镜变反膜中心反射率 R_0 决定了 T 的大小;按照变反膜设计的一般原则 $R_0 M^n = 1$ 时输出光束中心平顶,光束质量最好^[6]。但由于此时的输出耦合度过高,输出功率太低,不适用于高平均功率设计。兼顾输出功率和光束质量,取输出镜变反膜中心反射率 $85\% < R_0 < 90\%$ 。由于板条状工作物质的通光孔径为矩形,非轴对称,变反膜相应应设计成二维分布,即子午面和弧矢面的反射率分布不相同。考虑在子午面上板条的通光孔径较大,为 30mm,变反膜的阶数 n 取较大数值利于提高输出功率,实践证明 $6 < n < 15$ 是合理的。在弧矢面上,板条的通光孔径较小,为 6 mm,取 $2 < n \leq 6$ 为宜;膜尺寸根据 4% 截断准则确定。

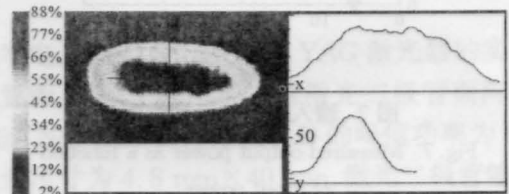


图4 输出镜变反膜反射率分布测量图

Fig. 4 Measured reflecting distribution of the two-dimensional variable reflectivity mirror

5 实验结果及讨论

实验采用了一根 $6 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 203 \text{ mm}$ 规格的 Nd:YAG 晶体,布氏角切割;聚光腔由漫反射陶瓷材料构成,抽运灯为四支脉冲氙灯,电源为 MK-10 开关型脉冲激光电源,四路,总输出可达 40 kW。整个系统在额定的抽运功率下,重频 100 PPS,输出功率 1028 W,单脉冲能量大于 10 J(脉宽大于 200 μs ,自由振荡),在 0.5 h 持续运转过程中,输出功率不稳定性为 2.1%,近场光斑如图 5 所示。图 6 为经一焦距 200 的透镜汇聚后束腰上的光强分布。光

束质量测试系统为 BGS6314 型光束分析仪, 给出的结果为, $M_x^2 = 2.386$, $M_y^2 = 2.528$ 。输入输出特性

曲线如图 7。

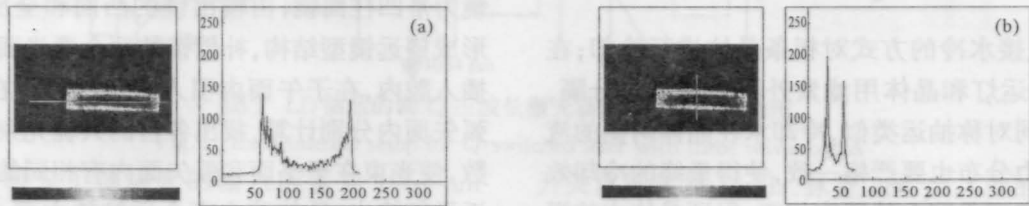


图 5 近场光强分布

Fig.5 Near-field image and intensity line

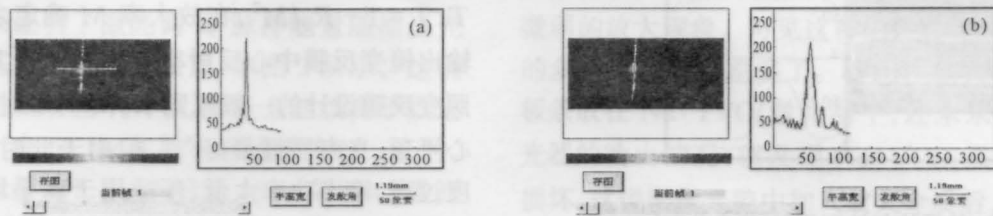


图 6 远场光强分布

Fig.6 Far-field image and intensity line

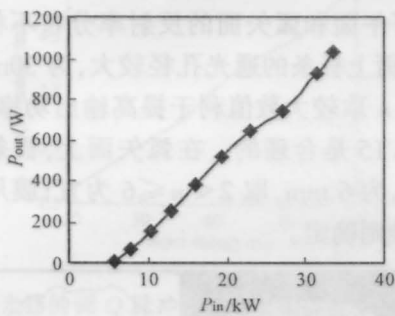


图 7 输入输出特性曲线图

Fig.7 Measured output power as a function of input power

由于工作物质的结构设计特点, 振荡光束在其中呈“之”字型传输, 使得热致双折射得到很好地补偿, 热透镜效应很小, 光束通过工作物质后的畸变小, 无显著退偏(偏振度大于 98%); 非稳定谐振腔可提供大的基模模体积, 选模能力强, 可保证较高的能量提取率, 低横模运转; 变反射率输出镜能有效改善非稳定谐振腔中的孔径衍射, 提高输出光束的光束质量。

参 考 文 献

- 1 W. S. Martin, J. Chernoch. Multiple internal reflection face-pumped laser, US patent 1972. 3633126
- 2 J. Chernoch. Characteristics of a 1 kW Nd:YAG face-pumped laser. *Invited Paper*, 1990, ICALEO'90
- 3 J. R. Untermahrer, M. J. Kukla *et al.*. High average power, high beam-quality, unstable-resonator slab laser. *OSA. Proceedings on Advanced Solid state Lasers*, 1995, 24:227~230
- 4 N. Hodgson, T. Haase. Beam parameters, mode structure and diffraction losses of slab lasers with unstable resonators. *Opt. Quant. Electron.*, 1992, 24:903~926
- 5 N. Hodgson, S. Dong, Q. Lü. Performance of a 2.3 kW Nd:YAG slab laser system. *Opt. Lett.*, 1993, 18(20): 1727
- 6 Masaki Seguchi, Kazuki Kuba. 1.4 kW Nd:YAG slab laser with a diffusive closed-coupled pump cavity. *Opt. Lett.*, 1995, 20(3):300~302
- 7 吕百达. 高功率板条固体激光器研究的进展. *中国激光*, 1994, A21(5):350
- 8 何慧娟等. 输出平均功率达 200 W 的板状激光器. *中国激光*, 1990, 17(9):513
- 9 Sandro De Silvestri *et al.*. lasers with super-Gaussian mirrors. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1990, 26:1500~1509